

DLR-IB-AT-KP-2018-120

**Vorstellung des
Getriebevorentwurfsverfahrens
GtGearbox**

Autor: Tom Otten



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**



Vorstellung des Getriebevorentwurfsverfahrens GtGearbox

Aktueller Stand des Prototypen 11/2017

Tom Otten

Institut für Antriebstechnik

Abteilung Triebwerk | Triebwerksvorauslegung



Wissen für Morgen



Inhalt

- **Hintergrund und Programmaufbau**
 - Initialer Getriebeentwurf
 - Festigkeitsbewertung
 - Geometrie-Optimierungen
- **Validierung**
 - PW1000
 - NASA AGBT
 - Korrelationsverfahren
- **Zusammenfassung & Nächste Schritte**



Programmbeschreibung

Übersicht

- Aktueller Stand:
 - Prototyp von GtGearbox ist erstellt
- Beschränkung auf Planetengetriebe
- Ziel: Auslegung von Getrieben für gegenläufige Propeller
- Zusätzlich Anwendbarkeit für sonstige Planetengetriebe
- Erweiterung auf Spur-Star Getriebe erfolgt später



GtGearbox



Programmbeschreibung Übersicht

Grundsätzlicher Rechenablauf von GtGearbox

1. Schritt:

- Erzeugen einer validen Getriebegeometrie aus Vorgaben
- Schätzung fehlender Geometrieinformationen

2. Schritt:

- Bewertung der Geometrie hinsichtlich Festigkeit

3. Schritt:

- Variation der Vorgabeparameter
- Optimierung des Entwurfs



Theorie des Getriebeentwurfes

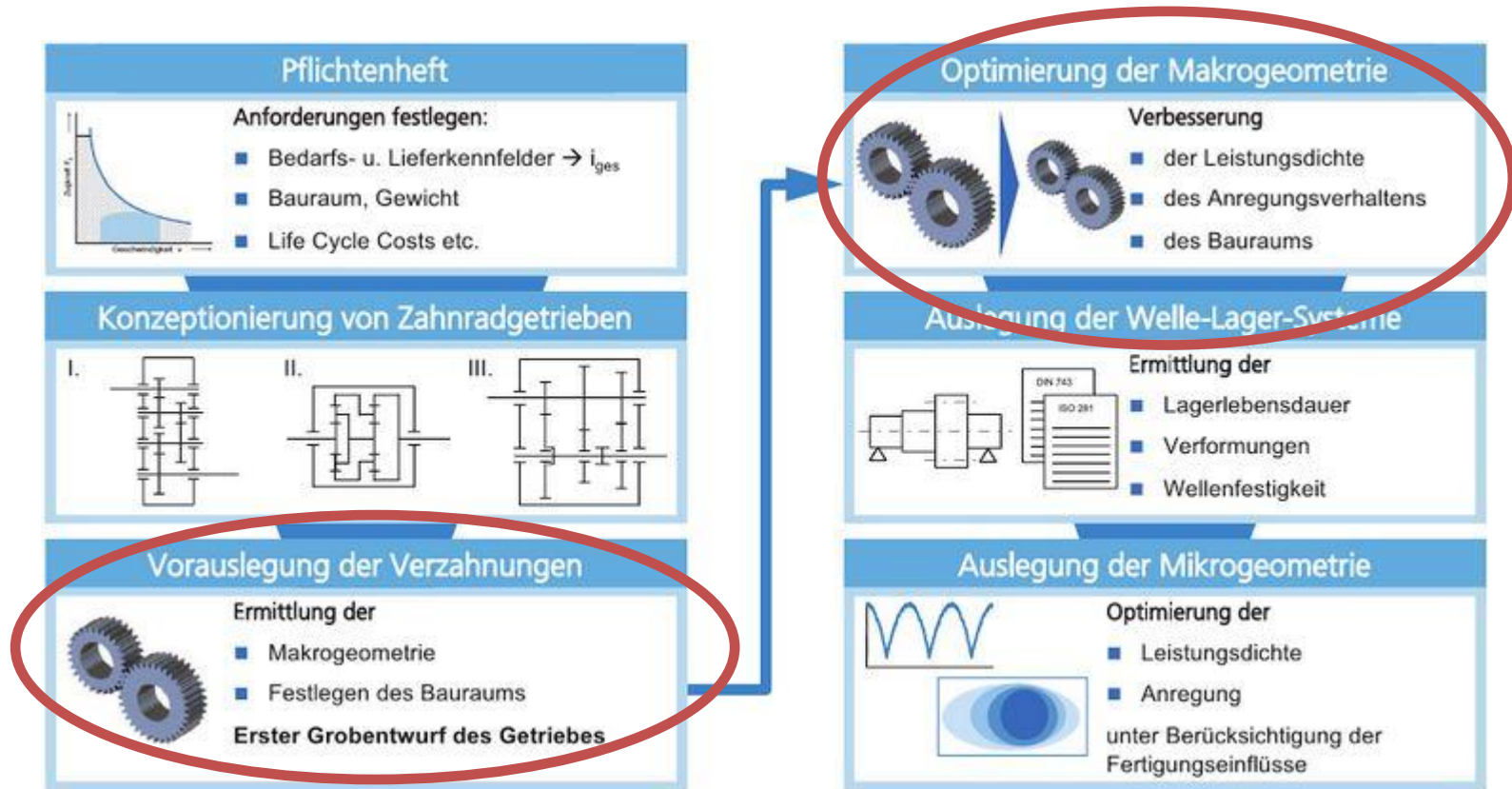
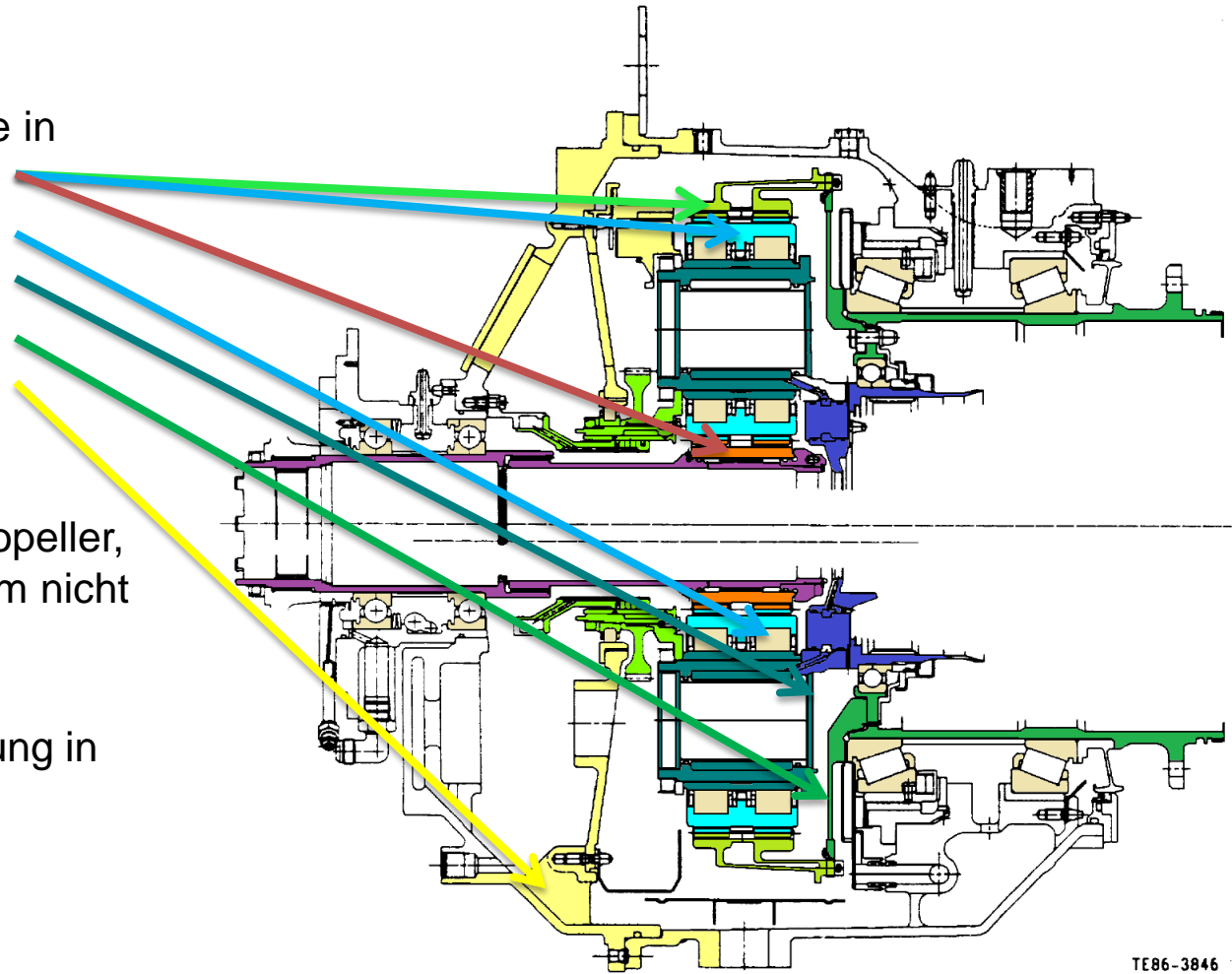


Fig. 3: Allgemeine Ablauf der Getriebeentwicklung nach Klocke/Brecher, Zahnrad- und Getriebetechnik, ISBN978-3-446-43068-6



Initialer Getriebentwurf

- Aufteilung der Geometrie in
 - Zahnräder
 - Planetenlager
 - Planetenträger
 - Ringwelle
 - Getriebegehäuse
- Hochintegriertes Bauteil
 - Bilanzgrenze zu Propeller, Wellen, Lagersystem nicht eindeutig definiert
- Grundlage für Modellierung in GtGearbox:
 - Parametrisierung der Bauteile



TE86-3846

Quelle: Nasa Advanced GearboxTechnology
Final Report, Nasa CR-179625, Bearbeitet



Initialer Getriebentwurf

Getriebeparametrisierung: Allg. Eingangsgrößen

- **Materialdaten:**
 - Vorgabe Dichte, E-Modul, PoissionZahl, SigmaH, SigmaF, SigmaS, Oberflächenbehandlung
- **Dimensionierender Lastfall:**
 - Vorgabe aller Drehzahlen und der zu übertragende Leistung
- **Geforderte Soll-Sicherheiten**
 - Für einzelne Zahneingriffe. Standard: Alle $SF=1.05$
- **Ölviskosität:**
 - Nue40 nach ISO Definition. Standard: $220 \text{ mm}^2/\text{s}$
- **Verzahnungsqualität**
 - Fertigungsgüte nach DIN. Standard: 5



Initialer Getriebentwurf

Getriebeparametrisierung: Verzahnung

- **Normalmodul (m_n)**
 - Initiale Schätzung des minimal möglichen Moduls aus vereinfachter Lastrechnung nach LINKE
 - Aufrunden auf Modul-Normreihe (Vorzugsreihe+Erweiterung)
- **Anzahl Zähne Sonnenrad (z_{sun})**
 - Initiale Schätzung der minimalen Zähnezahl aus vereinfachter Lastrechnung nach Linke
 - Basis ist minimaler Durchmesser. Aufrunden auf Ganzzahl.
- **Breite**
 - Initiale Schätzung: Breite der Verzahnung zu Sonnendurchmesser = 0.67
- **Kranzstärken (sr) von Ring, Planet und Sonne im Verhältnis zu Modul (m_n)**
 - Initiale Schätzung: $sr/m_n = 2.25$;
- **Druckwinkel (Alpha):**
 - Initiale Schätzung: 20°
- **Schrägungswinkel (Beta):**
 - Initiale Schätzung: 30°
- **Anzahl Planeten**
 - Schätzung nach LINKE über Geometrie, Einbaubedingung zunächst nicht berücksichtigt.
- **Spaltbreite in Zahnmitte:**
 - Werkzeugeingriff für V-Verzahnung. Initiale Schätzung: $5 \cdot m_n$
- **Bezugsprofil:** Rundungen, Zahnhöhen etc. nach DIN879
 - Initial: Standardprofil

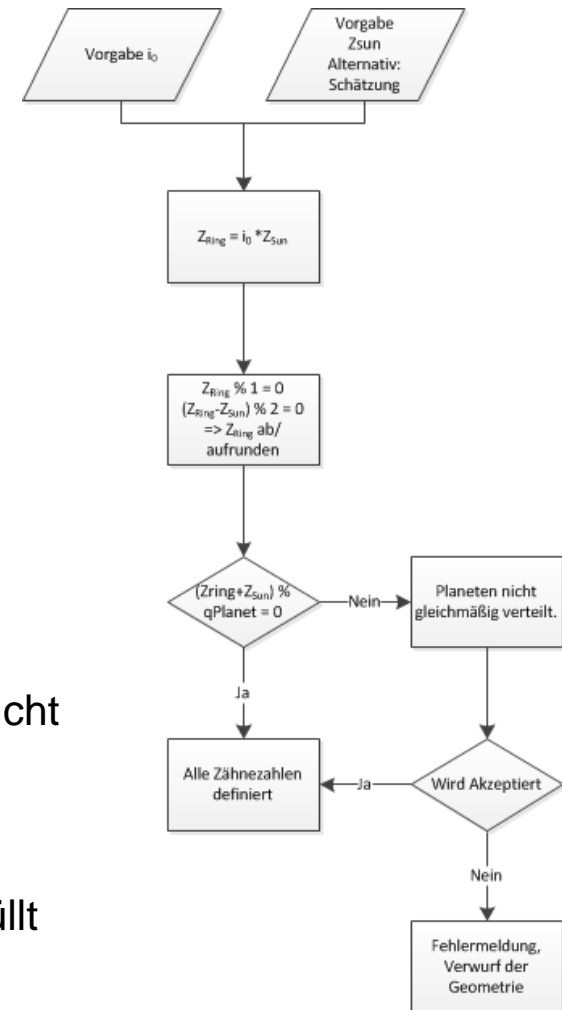


Initialer Getriebentwurf

Modellierung Zähnezahlen

- Zähnezahl Sonnenrad z_{Sun} und Übersetzungsverhältnis i_0 vorgegeben
 - $z_{ring} = i_0 * z_{sun}$
 - Bedingung 1: z_{ring} muss ganzzahlig sein
 - Bedingung 2: $(z_{ring} - z_{sun}) \% 2 = 0$ (ganzzahlige z_{planet})
 - Bedingung 3: $(z_{ring} + z_{sun}) \% AnzahlPlaneten = 0$ (Planeten gleichmässig verteilt)
- ⇒ Auf- oder Abrunden von z_{ring} notwendig
 ⇒ Kleiner Fehler im Übersetzungsverhältnis
- Einschränkungen:
 - Bedingung 2: Durch Profilverchiebung beeinflussbar, nicht modelliert
 - Bedingung 3: Bei stehendem Planetenträger nicht zwangsweise nötig (Abschaltbar)
 - Anzahl Planeten wird ggf. reduziert bis Bedingung 3 erfüllt ist.

⇒ Vollständige Getriebegeometrie erzeugbar



Initialer Getriebentwurf

Annahmen und Einschränkungen Verzahnung

- **Keine Profilverschiebung**

- Vielfältige Nutzungsmöglichkeit
- Beeinflussung von Zähnezahl Planet hierdurch möglich
- Großer Einfluss auf Einzelfestigkeiten
=> Detailoptimierung

- **Norm-Modulreihe**

- Normalmodule werden auf Norm-Reihe gerundet.

- **Fertigungstoleranzen**

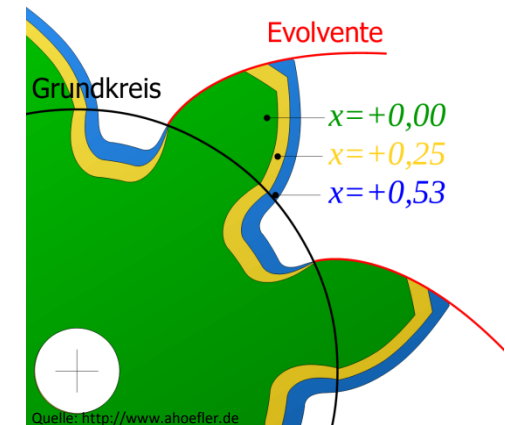
- Werden nach DIN 3962 ermittelt
- Verzahnungsqualität muss vorgegeben werden

- **Zahneingriffsstörungen**

- werden z.zt. nicht explizit überprüft
- Grund: Im Detailentwurf oft noch änderbar
 - Kopfkürzung, Protuberanz, ...

- **Anzahl Planeten:**

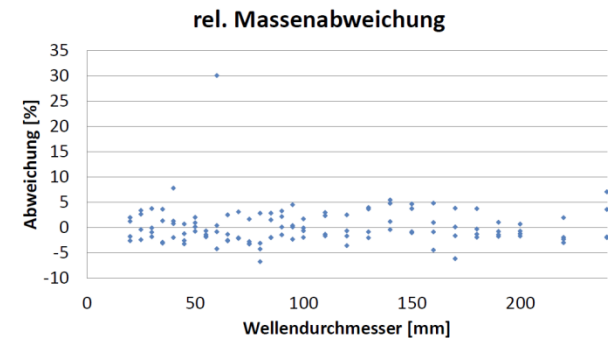
- Wenn nicht vorgegeben, wird grundsätzlich mit maximal möglicher Planetenzahl gerechnet



Initialer Getriebentwurf

Modellierung der Lagerung

- Getriebe ist hochintegriertes Bauteil
- Annahme:
 - Bei Planetengetriebe: Nur Lagerung der Planeten
 - Lagerung von An- und Abtriebswellen sind nicht Bestandteil des Getriebes
- Korrelation aus gängigen Lagerkatalogen erstellt (Masterarbeit B. Schneider)
 - Verfügbare Lager:
 - Rillenkugellager
 - Zylinderrollenlager
 - Zylinderrollenlager ohne Außenring
 - Rein geometrische Abschätzung
 - Vorhersage Gewicht und Geometrie
 - Abweichung der Korrelationen ~15%



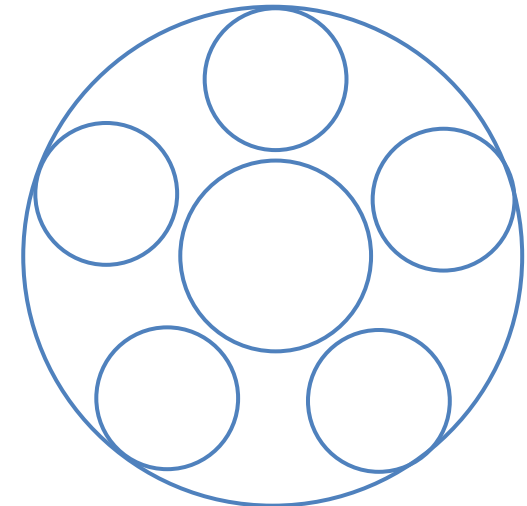
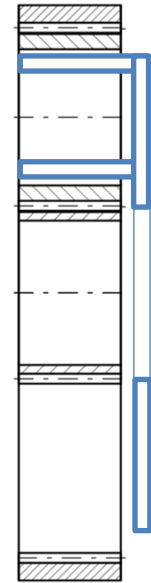
Beispiel: Fehler der Korrelation für
Zylinderrollenlager ohne Außenring



Initialer Getriebentwurf

Modellierung des Planetenträgers

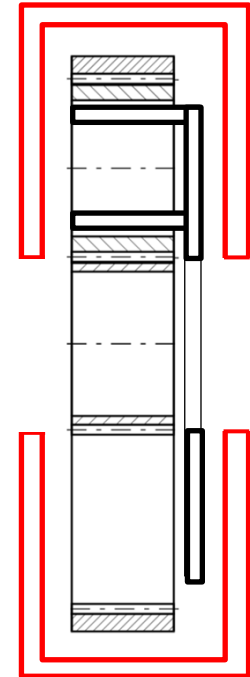
- Planetenträger
 - Real stark abhängig von Antriebsart (drehend, stehend)
 - Bauweise: sternförmig, ringförmig
 - Planetenbolzen abhängig von Lagerung
- Annahmen in GtGearbox:
 - Ringförmige Verbindung aller Planeten
 - Planetenzapfen über gesamte Getriebebreite
 - Durchmesser Zapfen:
 - Innendurchmesser Planetenlager
 - Durchmesser Planetenring:
 - Außen: Aus Zapfendurchmesser
 - Innen: Sonnen-Innendurchmesser
 - Abstände: Doppelte Materialstärke
 - Materialstärke: Vorgabe
 - Materialdichte: Vorgabe
- Ausblick:
 - Vereinfachte Festigkeitsanalyse zur Abschätzung der Materialstärke



Initialer Getriebentwurf

Modellierung des Gehäuses

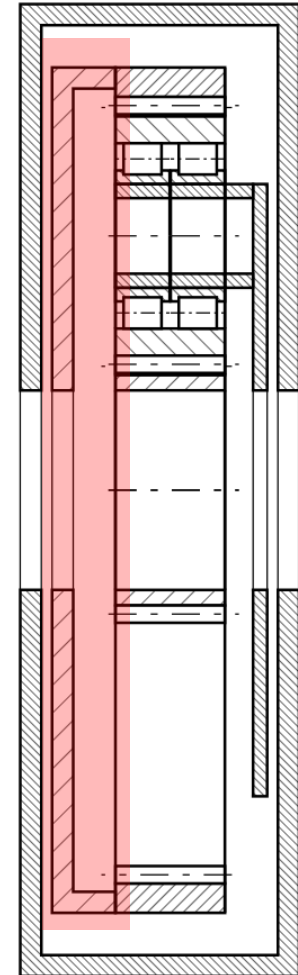
- Getriebegehäuse oft stark in Triebwerksentwurf integriert
- Design stark anwendungsabhängig (Anzahl Wellen etc.)
- Bilanzgrenze ist in der Regel unklar
- Annahmen in GtGearbox:
 - Gehäuse als Hohlzylinder ausgelegt
 - Abmaße aus Zahnradgeometrie abgeleitet
 - Öffnungen auf beiden Seiten:
 - Links: Innendurchmesser Sonnenrad
 - Rechts: Innendurchmesser Sonnenrad
 - Spaltmaße 5% von Breite bzw. Durchmesser
 - Materialdicke: Vorgabe
 - Materialdichte: Vorgabe



Initialer Getriebentwurf

Modellierung Ringwelle

- Bei drehendem Ring:
 - Abtriebswelle wird nicht auf Ring-Radius aus Getriebe kommen
 - Verbindung Ring auf anderen Radius
 - Stark Abhängig von Gesamtsystem
 - Bei stehendem Ring: Keine Ringwelle vorhanden
- Annahmen in GtGearbox:
 - Ringwelle setzt bei Außendurchmesser Hohlrad an
 - Reduktion auf Innendurchmesser Sonne
 - Axialer Abstand zu Getriebe: Doppelte Wandstärke
 - Materialstärke: Vorgabe
 - Materialdichte: Vorgabe
- Ausblick:
 - Vereinfachte Festigkeitsanalyse zur Abschätzung der Materialstärke



Initialer Getriebentwurf

Getriebeparametrisierung: Sonstige Komponenten

- **Planetenlagerung:**
 - Vorgabe Lagertyp: (Cylinder, Ball, CylinderNoOuterRing oder None): **Standard : None**
- **Planetenträger:**
 - Wandstärke, Dichte. **Standard : Kein Planet Carrier**
- **Ringwelle:**
 - Wandstärke, Dichte. **Standard : Keine Ringwelle vorhanden.**
- **Getriebegehäuse:**
 - Wandstärke, Dichte. **Standard : Kein Casing**



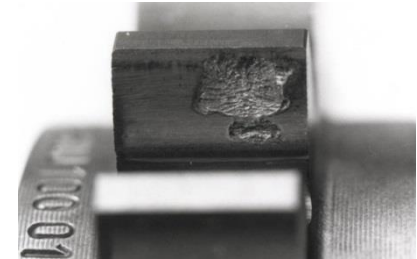
Bewertung der Getriebegeometrie



Bewertung der Getriebegeometrie

Bewertung der Verzahnung

- Ermittlung der Sicherheit gegen Dauerlast
- **Zahnfußtragfähigkeit nach DIN3990**
 - Überschreiten der max. Zahnfußspannung
 - Untersuchung für jeden Zahneingriff und jedes Zahnrad
 - i.d.R ist Planetenrad dimensionierend
- **Flankentragfähigkeit / Grübchentragfähigkeit nach DIN3990**
 - Lokale Hertz'sche Pressung überschreitet Materialwerte
 - Untersuchung für jeden Zahneingriff und jedes Zahnrad
- **Zahnkranzfestigkeit nach VDI2737**
 - Überschreiten der max. Spannung im flexiblen Hohlradkranz
 - Untersuchung nur am Zahneingriff Hohlrad-Planet



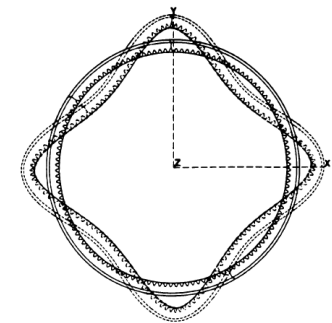
Grübchenbildung

Quelle: Vill, D., "Pittingtests: Untersuchung der Grübchentragfähigkeit",



Zahnfußschädigung

Quelle: Tandler, "Doppelschrägverzahnung und Pfeilverzahnung schleifen auf der Niles",



Quelle: VDI2737



Bewertung der Getriebegeometrie

DIN 3990 Physikalische Einflussfaktoren

- Grundsätzlicher Ablauf:

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{Ertragbare Spannung}}{\text{Auf tretende Spannung}}$$

- Vielfältige Einflussfaktoren vorhanden
- Unterschiedliche Modellierungsansätze in DIN vorhanden
 - Möglichst genaue Modellierung durchgeführt

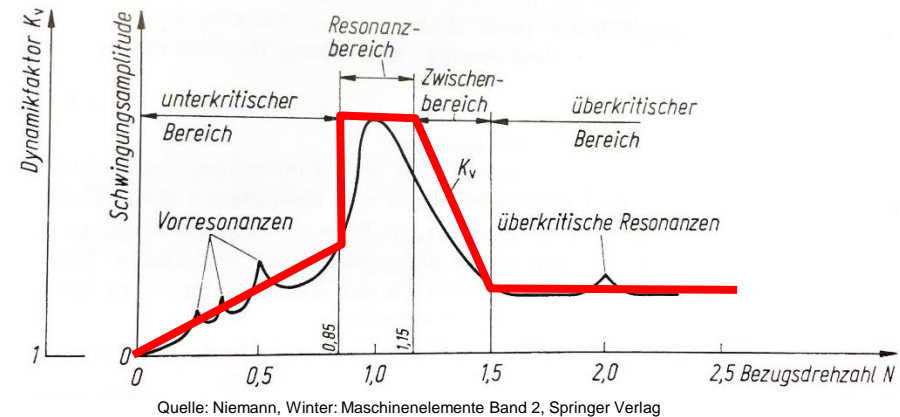
Allgemeine Lastfaktoren (K-Faktoren)	Kontakt-Koeffizienten (Z-Faktoren)	Biege-Koeffizienten (Y-Faktoren)
Anwendungsfaktor	Lebensdauerfaktor	Spannungskorrekturfaktor
Aufteilungsfaktor	Schmierstofffaktor	Lebensdauerfaktor
Dynamikfaktor	Rauigkeitsfaktor	Relative Stützziffer
Breitenfaktor für Flankenpressung	Geschwindigkeitsfaktor	Relativer Oberflächenfaktor
Breitenfaktor für Zahnfußfestigkeit	Werkstoffpaarungsfaktor	Größenfaktor
Stirnfaktor für Flankenpressung	Größenfaktor	Formfaktor
Stirnfaktor für Zahnfußfestigkeit	Einzeleingriffsfaktor	Spannungskorrekturfaktor
	Zonenfaktor	Schrägenfaktor



Bewertung der Getriebegeometrie

Beispiel Dynamikfaktor

- Dynamikfaktor K_v
 - beschreibt zusätzliche Last durch Schwingungen
 - Im Vorentwurf schwer zu bestimmen
 - Mehrere unterschiedliche Rechenansätze vorhanden
 - Einfache Ansätze unbrauchbar, da zu ungenau
 - Detailliertester Ansatz: Messdaten (Schwingungsversuche) nötig
- Ansatz:
 - DIN3990 Methode B
 - Abschätzung von Eigenfrequenzen
 - Federsteifigkeit der Zähne
 - Masse Zahnrad
 - Vergleich mit Drehzahlen
 - Bestimmung Hauptresonanzbereich

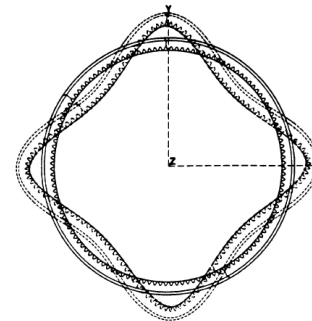


Bewertung der Getriebegeometrie

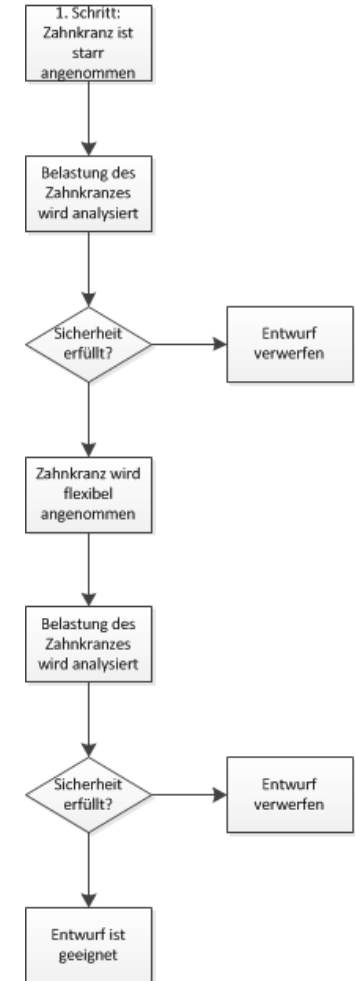
Kranzstärke Hohlrad (VDI2737)

- Nach DIN: Zahnkranz ist starr, Belastung wird nicht analysiert
- Erweiterung VDI2737:
 - 1. Schritt: Zahnkranz wird starr angenommen.
 - Belastung des Kranzes wird analysiert.
 - 2. Schritt: Zahnkranz ist flexibel.
 - Belastung des Kranzes wird analysiert.
- Einschränkungen
 - Stützende Wirkung umgebender Bauteile nicht berücksichtigt.
 - Gehäuse
 - Lastabstützung
 -

=> Benötigte Kranzdicke wird konservativ abgeschätzt



Quelle: VDI2737



Optimieren der Geometrie

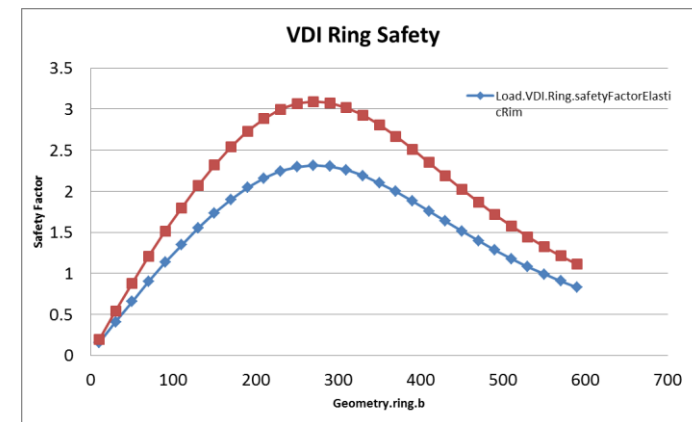
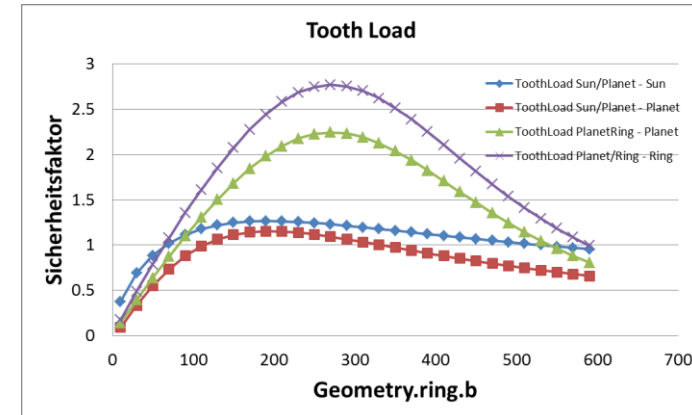
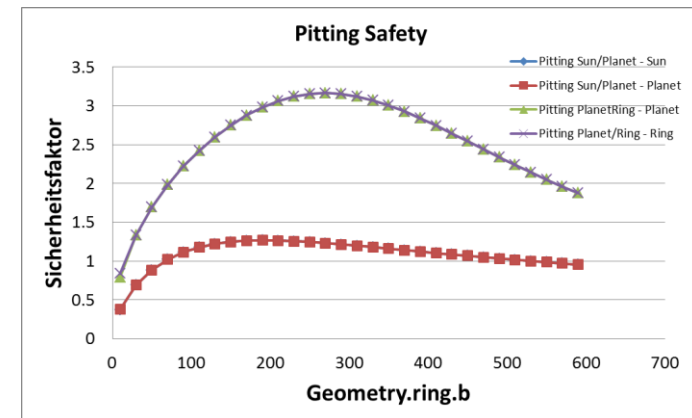
Optimierungsansätze

- Abschätzungsformeln für Geometrie oft nur beschränkt brauchbar
 - Haupt-Anwendung: Stirnradstufe, kein Leichtbau
- Getriebe-Lastrechnung benötigt nur minimale Rechenzeit ($\ll 0.1s$)
- Globale Optimierung
 - Sehr viele Parameter
 - Für Vorentwurf ungeeignet
- Reduktion der Einflussparameter:
 - Haupt-Einflussfaktoren für Gewicht und Größe:
 - Zähnezahl
 - Zahngröße (Normalmodul)
 - Getriebebreite
 - Kranzstärke Ring
- Weitere Einflüsse
 - Schrägungswinkel
 - Druckwinkel
- Durchführung von Parameterstudien zu Haupt-Einflussfaktoren



Optimierungsansätze Getriebebreite

- Annahme:
 - Je breiter, desto höher die ertragbare Last
 - Parameterstudie:
 - Sicherheiten steigen erst, dann sinken sie ab
 - Grund:
 - Breitenfaktoren steigt bei extrem breiten Verzahnungen an (Breite > Durchmesser)
- => Bereich für Luftfahrtgetriebe nicht relevant
- **Nutzung in GtGearbox:**
 - Variation der Getriebebreite so, dass geforderte Minimalsicherheit erfüllt wird.
 - Ausgehend von geringer Breite linke und rechte Seite für Bisektionsverfahren automatisch bestimmen

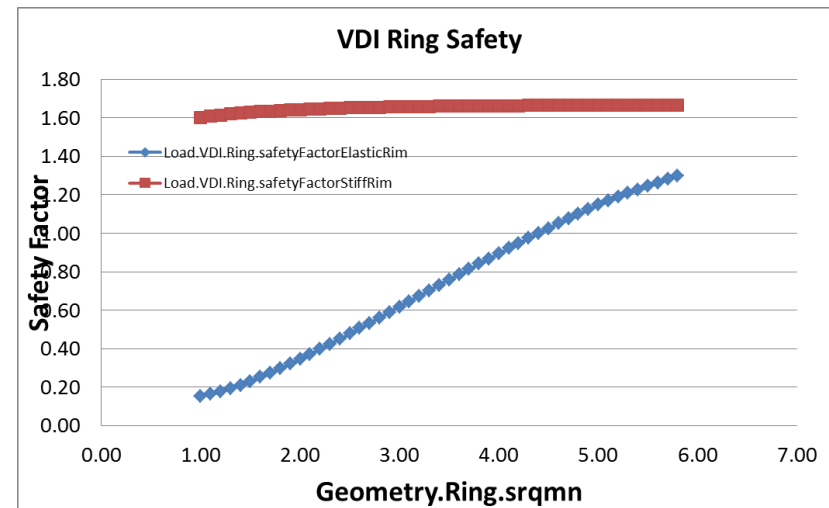
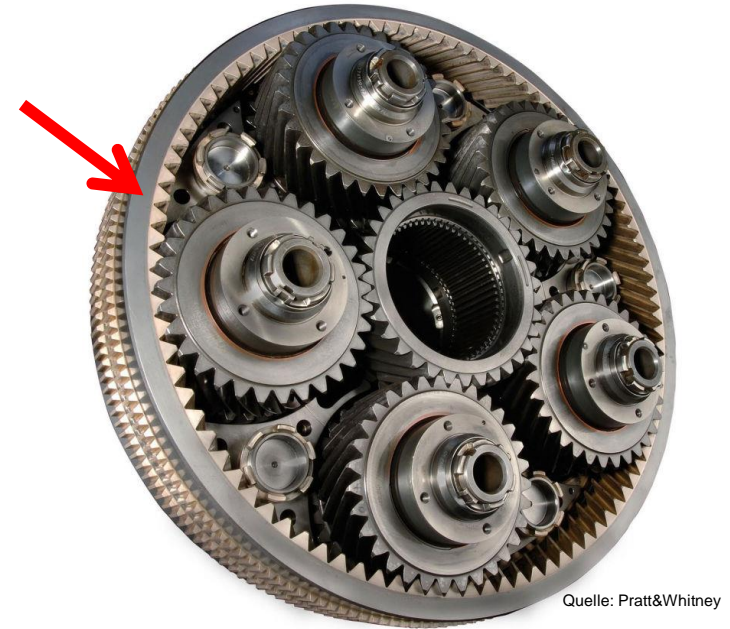


Optimierungsansätze Kranzstärke Ring

- Kranzstärke der Zahnräder hat großen Einfluss auf Gewicht, insb. Hohlrad
- Relevanter Parameter: Kranzstärke pro Modul
- Parameterstudie:
 - Sicherheit gegen Kranzbruch hängt von Kranzstärke ab.
- Andere Sicherheiten nach DIN nicht betroffen

Anwendung in GtGearbox:

- Bestimmung der Kranzstärke so, das geforderte Sicherheit erreicht wird.
- Problematisch:
 - Einbaueffekte fehlen
 - => Überdimensionierend
- Lösungsmöglichkeit:
 - Sollsicherheit ggf. < 1 wählen

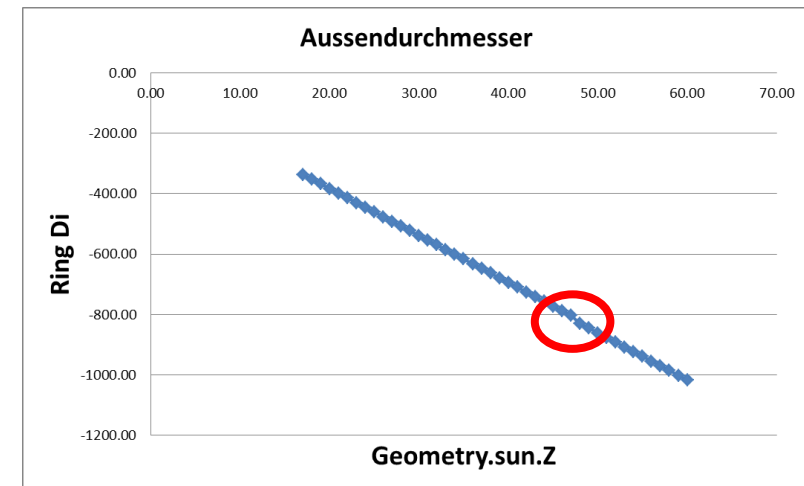
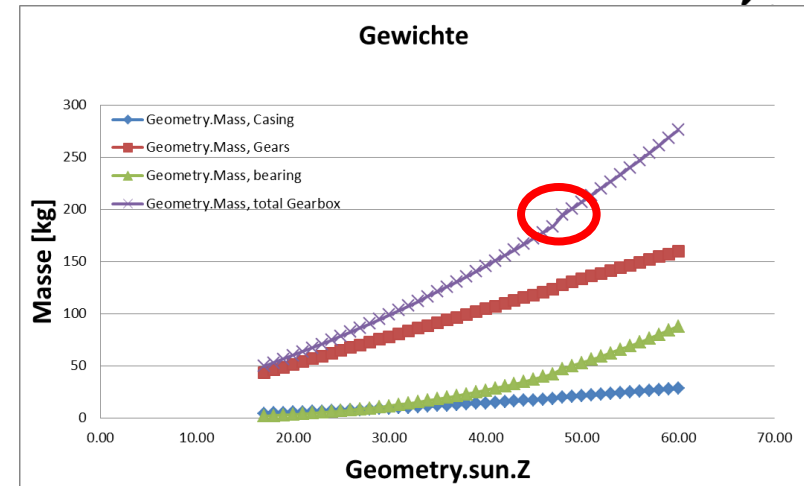




Optimierungsansätze

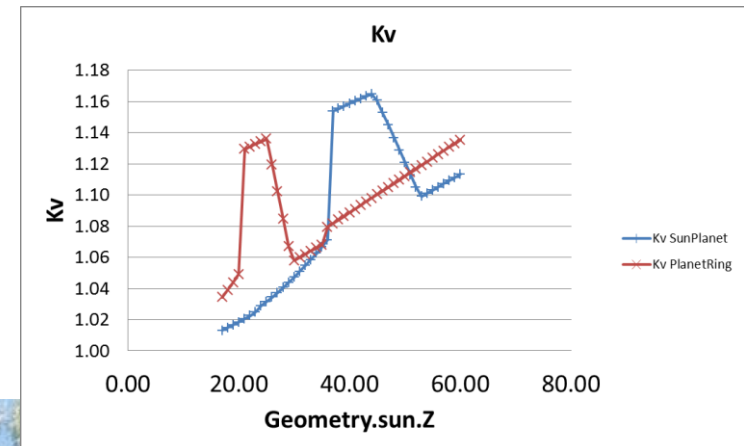
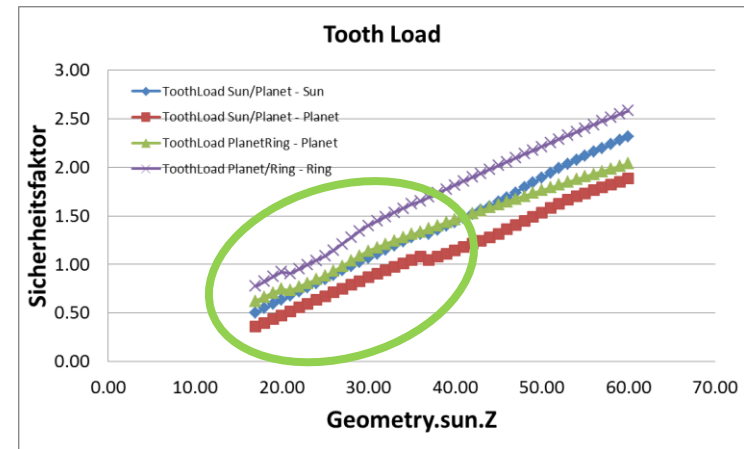
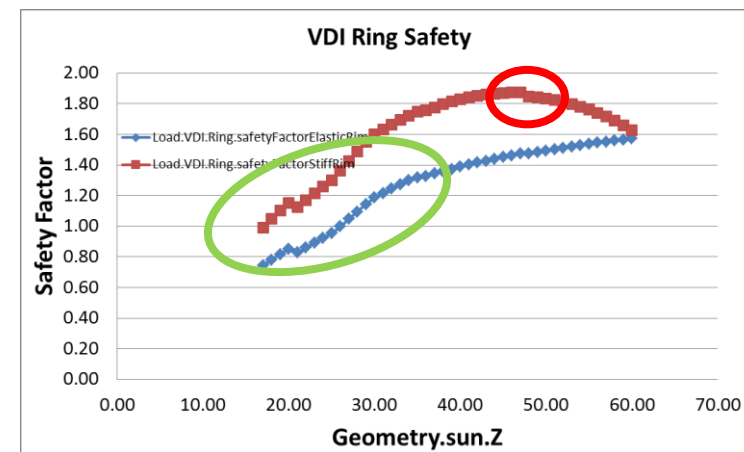
Zähnezahl Sonnenrad

- Zähnezahl der Sonne Z_{sun} beeinflusst gesamtes Getriebedesign
- Parameterstudie: Variation von Z_{su}
 - Sonstige Parameter konstant
 - Breite
 - Kranzstärke
 - Zahngröße
 - ...
- Bei gleicher Zahngröße steigt Durchmesser und Gewicht stark an
- Unstetigkeiten!
- Ursache: Rundung der Zähnezahlen



Optimierungsansätze Zähnezahl Sonnenrad

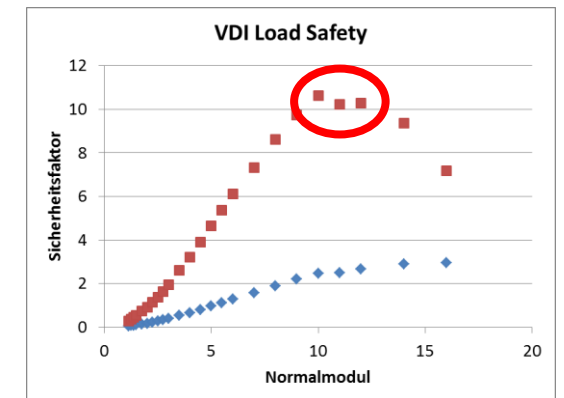
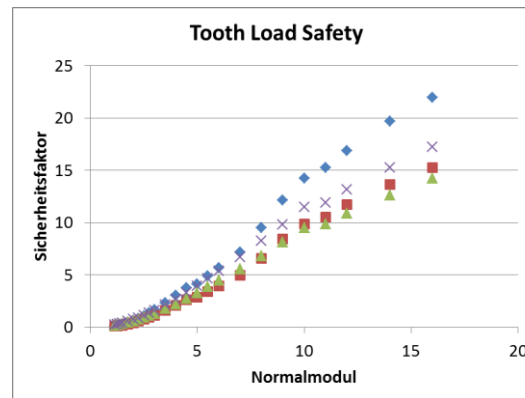
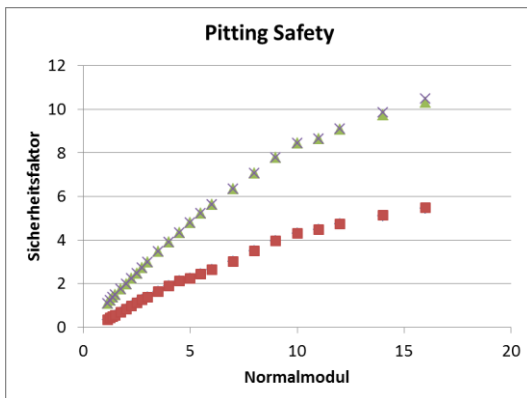
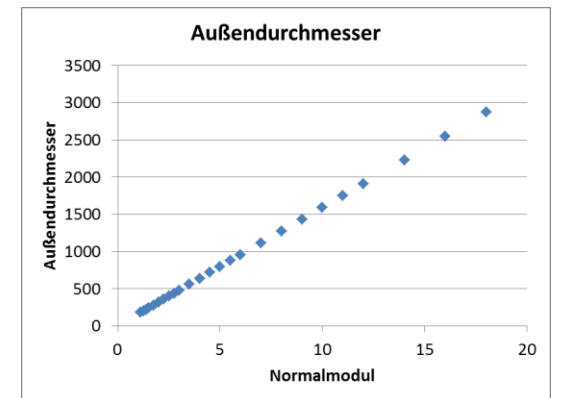
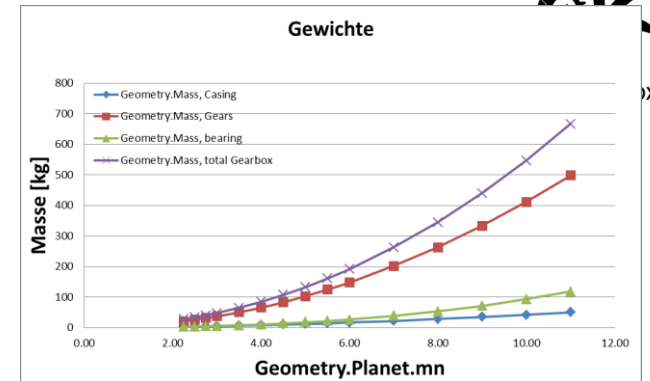
- Errechnete Sicherheiten zeigen ebenfalls starke Unstetigkeiten
- Rundungseffekt Zähnezahl
- Resonanzen => Dynamikfaktor
- Andere Toleranzen nach DIN
- Nutzung in GtGearbox:
 - Große Wechselwirkung zwischen Zähnezahl und Zahngröße
 - Keine eigenständige Optimierung sinnvoll
 - Interne Parametervariation, finden bester Kombinationen



Optimierungsansätze

Variation Modul

- Parameterstudie: Variation von Normalmodul
- Bei gleicher Zähnezahle steigt Durchmesser und Gewicht stark mit dem Modul an
- Unstetigkeiten durch Resonanz möglich
- Nutzung in GtGearbox:
 - Große Wechselwirkung zwischen Zähnezahle und Zahngröße
 - Keine eigenständige Optimierung sinnvoll
 - Interne Parametervariation, finden bester Kombinationen



Nutzen von GtGearbox I

Nachberechnung von (teilweise) bekannter Geometrie

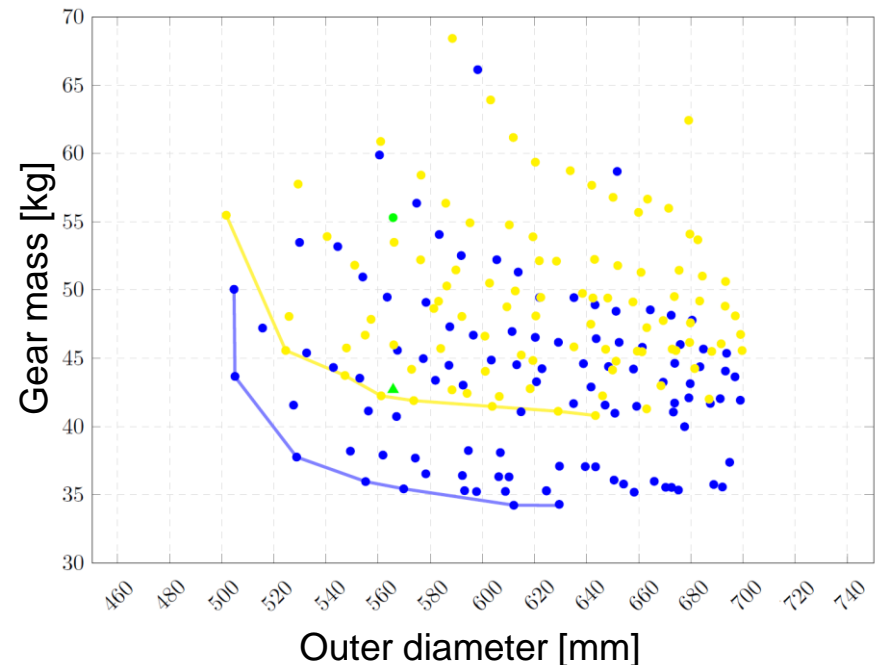
- Geometrie des Getriebes bekannt
 - Getriebeparametrisierung über Inputfile vorgegeben
- ⇒ GtGearbox berechnet die auftretenden Sicherheiten nach DIN und VDI für alle Zahneingriffe
- Unbekannte Geometrieparameter werden vom Programm geschätzt.
 - Insbesondere für Modul und Zähnezahl oft nur grobe Anhaltswerte
 - Breitenoptimierung:
 - Bekannte Geometrie wird in der Breite so angepasst, dass die geforderten Mindestsicherheiten genau erreicht werden.
 - Kranzstärkenoptimierung
 - Kranzstärke Ring wird so optimiert, dass geforderte Mindestsicherheiten erreicht werden



Nutzen von GtGearbox II

Anpassung von Modul und Zähnezahl

- Zähnezahl und/oder Modul kann vom Programm automatisiert variiert werden.
- Für jede Kombination:
 - Optimierung Breite + Kranzstärke [optional]
 - Prüfung Soll-Sicherheiten
- Optimierungsziel nicht eindeutig definierbar
 ⇒ Ideales Getriebe erfordert Bewertung durch den Benutzer
- Umsetzung in GtGearbox:
 - Design-Constraints:
 - Maximaler Außendurchmesser
 - Minimaler Innendurchmesser
 - Maximale Breite
 - Minimale Anzahl Planeten
 -
 - Ausgabe aller Entwürfe sortiert nach Gesamtgewicht



Validierung



Validierung Ablauf

- Validierung erfolgt in zwei Stufen
- 1. Validierung der Lastberechnung
 - Getriebedaten aus Literatur ermitteln
 - Vergleich der Lastrechnung mit KISSsoft
 - Bewertung aller einzelnen Lastfaktoren
 - Erläuterung der Abweichungen
- 2. Validierung des Vorentwurfsverfahrens
 - Vergleich der Ergebnisse mit Getriebedaten aus der Literatur
 - Erläuterung der Abweichungen
- Zwei Getriebe in Literatur gefunden:
 - PW1100g
 - NASA „Advanced Gearbox Technology“ Report



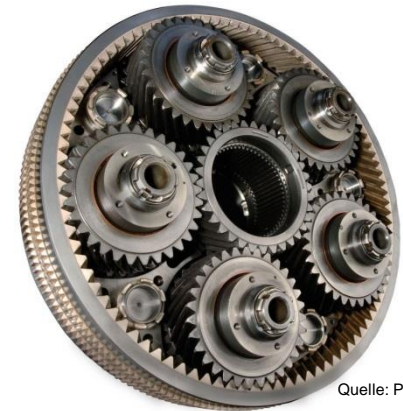
Validierung

Validierungsdaten PW1100g

- Zulassungsdaten FAA/EASA:
 - Übersetzungsverhältnis $i_0 = 3.0625$
- Zähnezahlen aus Fotos:
 - $Z_{\text{sun}}=34, Z_{\text{Planet}}=31, Z_{\text{Ring}}=98 \Rightarrow i_0 = 2.8824$
- ⇒ Übersetzungsverhältnis inkonsistent!
- ⇒ Fotos oder Zulassungsdaten falsch
- Annahme: Zulassungsdaten stimmen:
 - Passend wäre: $Z_{\text{sun}}=32, Z_{\text{Planet}} \sim 33, Z_{\text{Ring}}=98$
 - Gleichmäßige Verteilung der Planeten möglich
- Gewicht laut Literatur: 113 kg*
 - Bilanzgrenze unklar
- Sonstige Geometrie nicht bzw. grob bekannt
- Lastfall (DLR Performance-Schätzung)
 - Leistung: 26.97 MW
 - Drehzahl Ein: 8278 RPM
 - Drehzahl Aus: -2703 RPM



Quelle: <https://www.unibw.de/eit61/aktuelles/aaa-forum/aaa-forum19/vortrag-walther2>



Quelle: Pratt&Whitney

* Quelle: K.P. Rossow: Handbuch der Luftfahrzeugtechnik, ISBN 978344642341



Validierung PW1000 Getriebe in KISSsoft

- Validierung der Lastberechnung
- Finden von fehlerhaften Implementierungen in GtGearbox
- Füllen von Lücken in den Validierungsdaten
- Bei Vorgabe geschätzter Getriebeparameter:
 - Soll-Sicherheiten in KISSsoft zunächst deutlich unter 1

⇒ Nachmodellierung in KISSsoft nicht direkt möglich

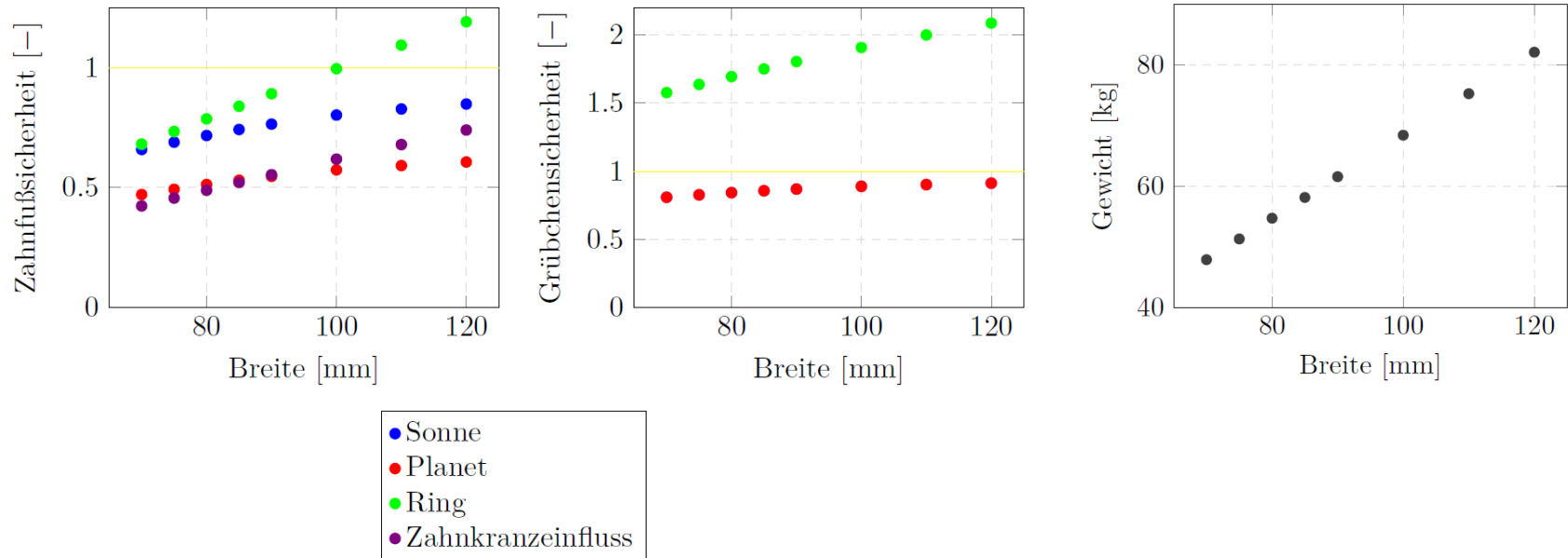
- Parameterstudien zum Auffinden einer machbaren Geometrie durchgeführt
- Arbeit wurde durchgeführt in:
 - Bachelorarbeit Dominik Maaß: *Weiterentwicklung und Validierung eines Vorentwurfsverfahrens für Getriebe in Flugantrieben, DLR, 2017*



Validierung PW1000G

Parameterstudie Breite in KISSsoft

- Breite variiert von 70 -120 mm



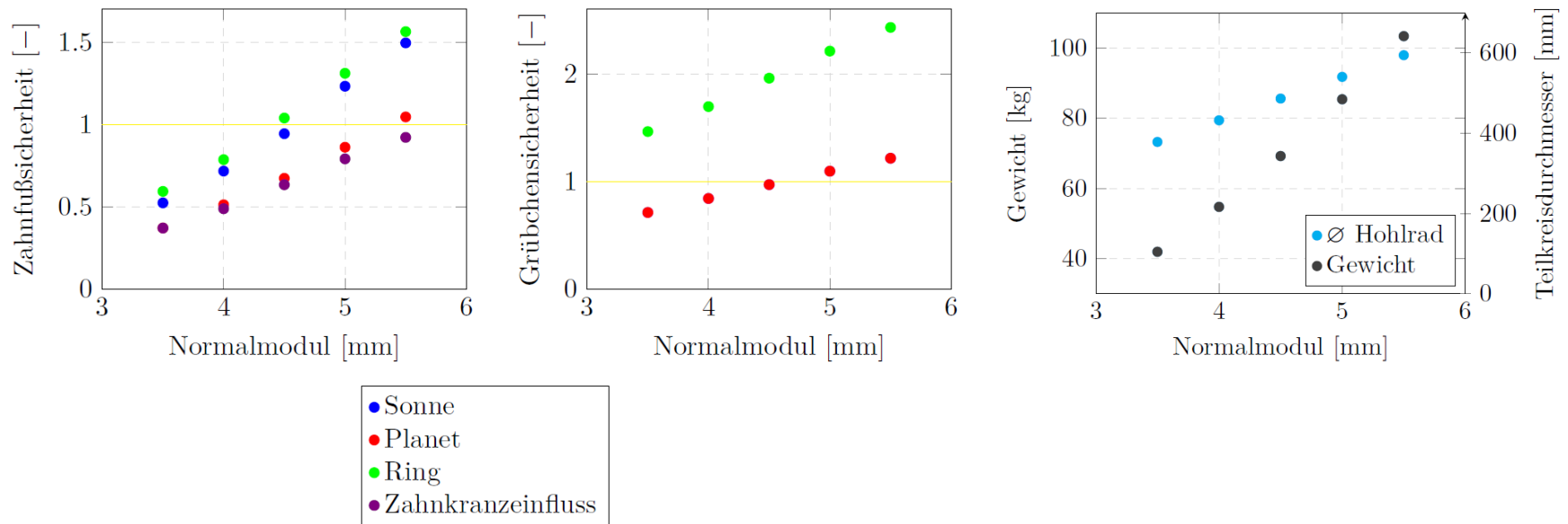
- Ab 100mm bei Sonne und Planet kaum eine Änderung der Sicherheit mehr



Validierung PW1000G

Parameterstudie Normalmodul in KISSsoft

- Normalmodul variiert von 3.5 bis 5.5



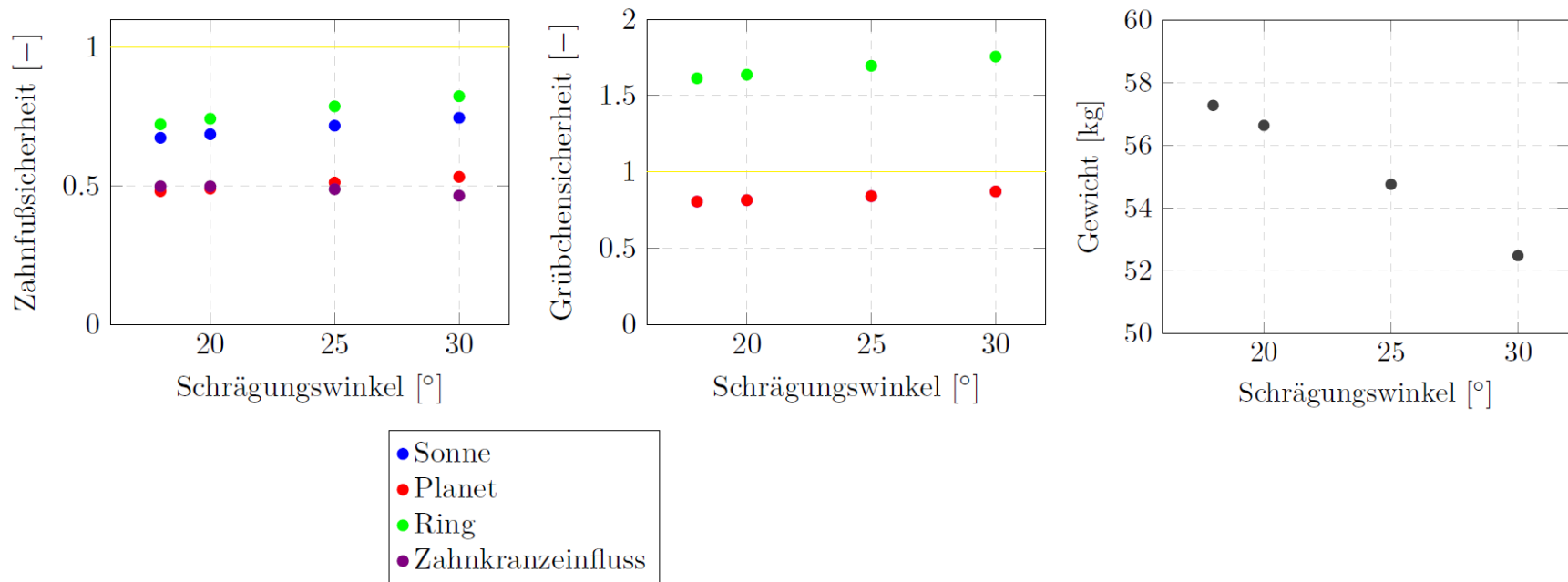
- Sicherheiten steigen, Gewicht und Durchmesser steigen stark.



Validierung PW1000G

Parameterstudie Schrägungswinkel in KISSsoft

- Schrägungswinkel variiert von 18 bis 30 Grad bei gleichbleibenden Stirnmodul



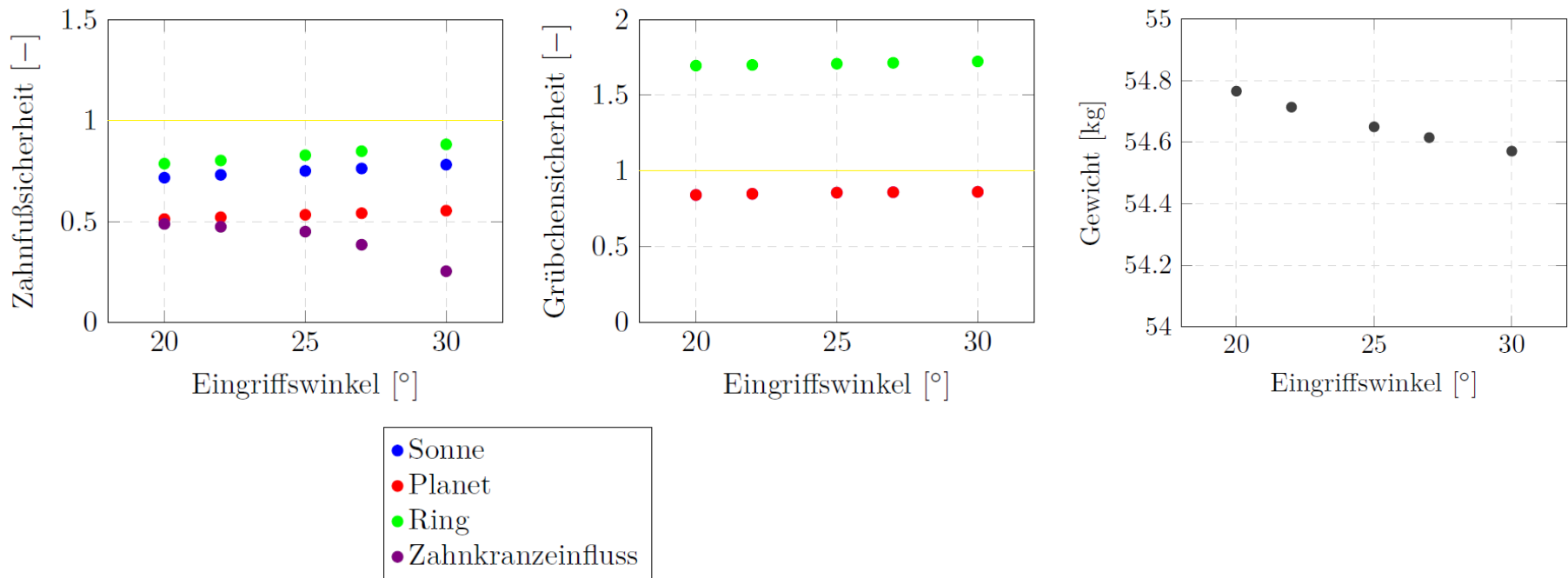
Sicherheiten steigen teilweise an, Gewicht sinkt leicht



Validierung PW1000G

Parameterstudie Normal-Eingriffswinkel in KISSsoft

- Eingriffswinkel im Normalmodul variiert von 20 bis 30 Grad



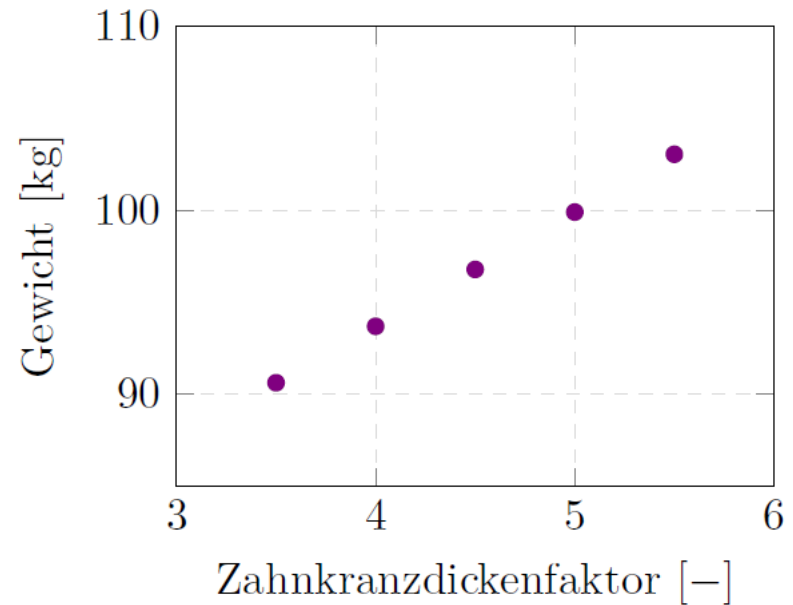
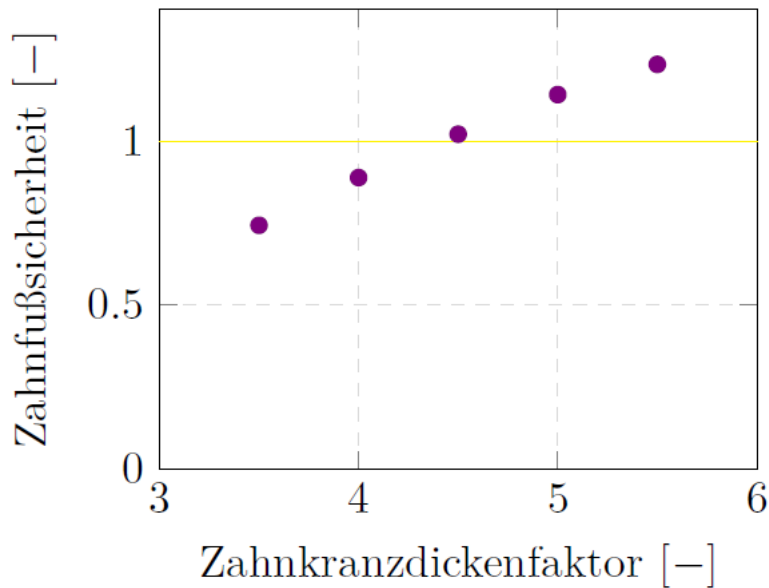
- Einfluss ist gering



Validierung PW1000G

Parameterstudie Zahnkranzdickenfaktor

- Zahnkranzdickenfaktor variiert von 3.5 bis 5.5



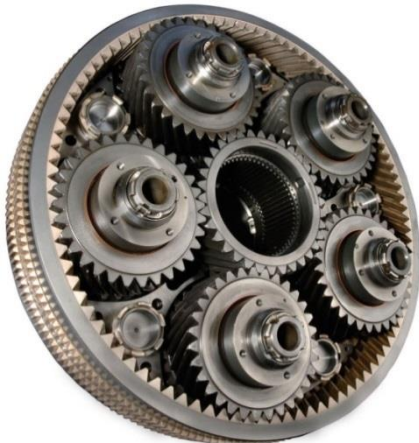
Höhere Kranzstärke erhöht Gewicht, Belastbarkeit steigt an.



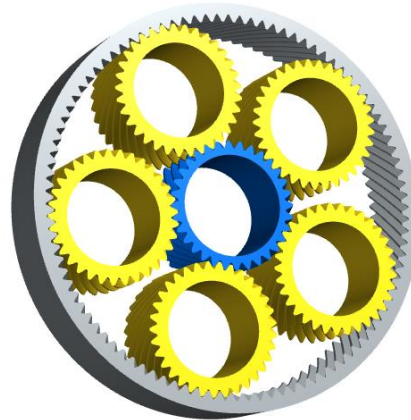
Validierung PW1000G

Ergebnisse aus KISSsoft

- Entwurf aus Parameterstudien bestimmt
- In KISSsoft keine weitergehende Optimierung möglich
- Entwurf erscheint etwas groß
- Zum Vergleich GtGearbox und KISSsoft gut geeignet
- Abweichungen zum realen PW1000 mangels Daten nicht bestimmbar



PW1000 (Quelle: PW)



Kisssoft Ergebnis

Eingangsgrößen	
Breite	100 mm
Normalmodul	4.5 mm
Schrägungswinkel	30°
Eingriffswinkel im Normalschnitt	25°
Zahnkranzdickenfaktor Hohlrad	5
Zahnfußsicherheit	
Sonne	1.3244
Planet	0.9394
Hohlrad	1.5334
Mit Zahnkranzeinfluss	1.156
Grübschensicherheit	
Sonne	1.1638
Planet	1.1638
Hohlrad	2.3715
Bewertungskriterien	
Teilkreisdurchmesser Ring	509.223 mm
Außendurchmesser Ring	551.930 mm



Validierung PW1000G

Methodenvalidierung mit Kisoft

- Vorgabe der Geometrie in GtGearbox
 - Nachrechnung aller Lastfaktoren
- Gute Übereinstimmung der Sicherheitsfaktoren
- Ursachen für Abweichungen:
- Profilverschiebung
 - In KISSsoft $x \neq 0$
 - Großen Einfluss auf Kerbwirkung
- Modellierungsansätze unterschiedlich
 - Dynamikfaktor
- Modellierung Zahnfußgrund nach VDI
 - Biegehebelarm am Zahn
 - Norm nicht eindeutig
 - Diskussion mit VDI läuft
 - Norm wird überarbeitet

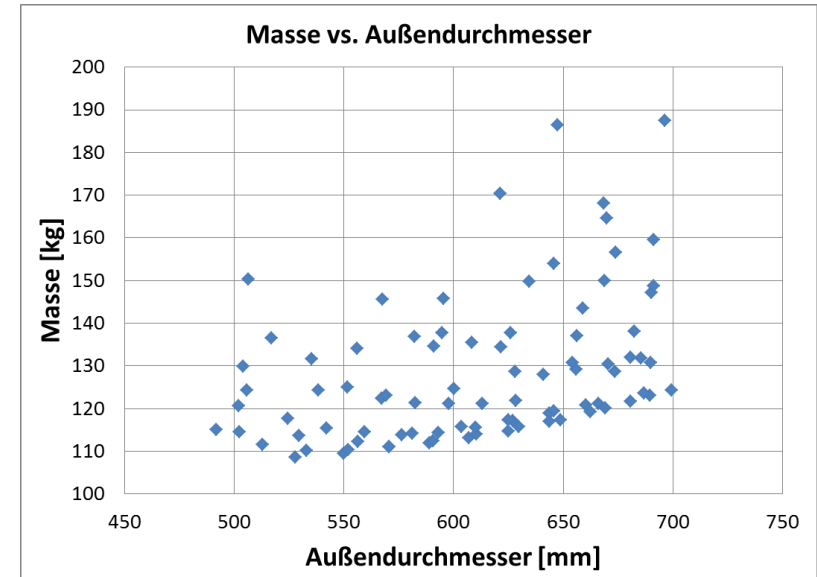
	Kisoft	GtGearbox	Rel. Abw.
Sicherheiten Zahnfußbruch [-]			
Sonne-Planet Eingriff: Sonne	1.32	1.343	1.78%
Sonne-Planet Eingriff: Planet	0.94	0.940	0.04%
Planet-Ring Eingriff: Planet	1.22	1.208	-0.97%
Planet-Ring Eingriff: Ring	1.53	1.490	-2.60%
Sicherheiten Pitting [-]			
Sonne-Planet Eingriff: Sonne	1.16	1.150	-0.89%
Sonne-Planet Eingriff: Planet	1.16	1.150	-0.89%
Planet-Ring Eingriff: Planet	2.37	2.331	-1.64%
Planet-Ring Eingriff: Ring	2.37	2.331	-1.64%
Sicherheit gegen Kranzbruch [-]			
Sicherheit gegen Dauerbruch: Ring	1.628	1.665	2.26%



Validierung PW1000G

Validierung Vorentwurfsmodus

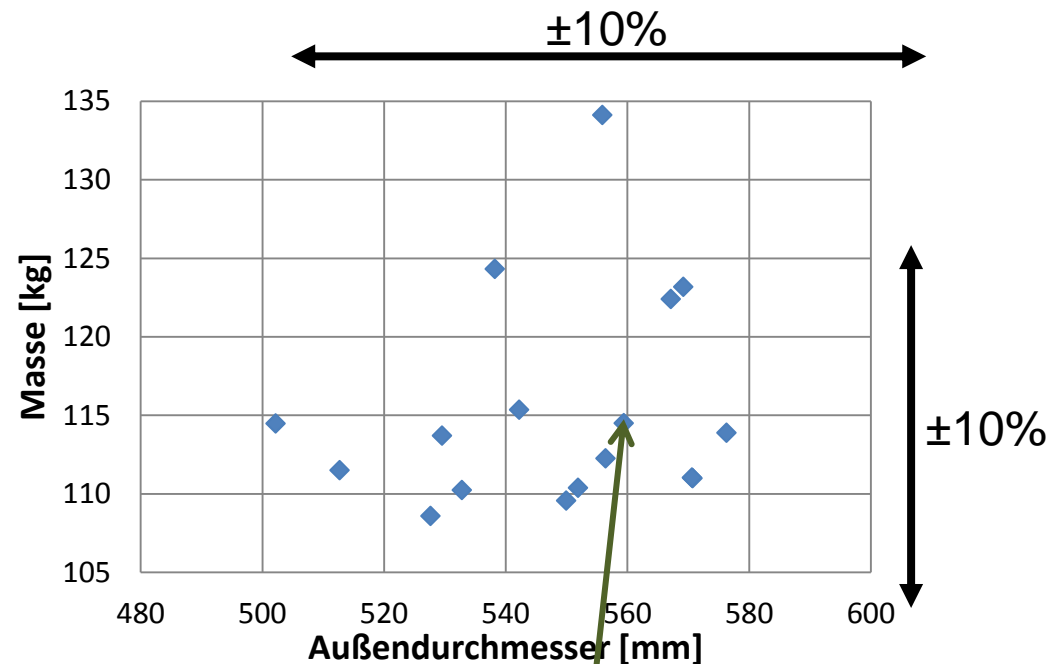
- Annahmen:
 - Lastfall aus PW1000 Studie
 - Übersetzungsverhältnis aus TCDS
 - Material: 17CrNiMo6
 - Planetenträger (Stahl, 10mm Wandstärke)
 - Alle Sicherheitsfaktoren = 1.0
 - Keine Geometrievorgaben der Räder (!)
 - Modul: 2-10mm
 - Zähnezahlsonne: 10-80
- Ergebnis:
 - Große Streubreite bei Durchmesser
 - Beste erreichbare Masse schwach abhängig von Durchmesser
- Nächster Schritt: Filterung!
 - Max. Durchmesser 580mm
 - Max. Breite: 140mm



Validierung PW1000G

Validierung Vorentwurfsmodus

- Mehrere „Gute“ Member gefunden
- Interpretation notwendig
 - Resonanzfrequenz?
 - Innendurchmesser?
 - Max. Breite, Durchmesser?
- Schwankung bezüglich Masse
 - Je nach Filterung
 - Relativ geringe Streubreite
 - $\pm 10\%$
- Schwankung Außendurchmesser
 - Je nach Filterung



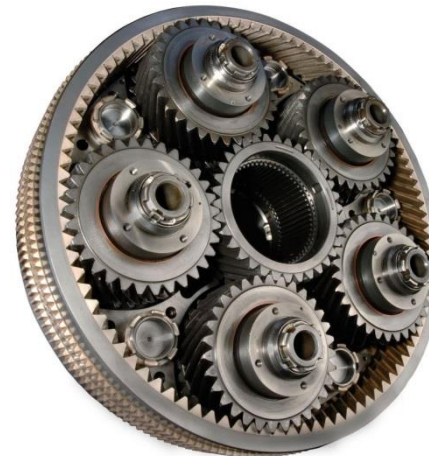
Design Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Normalmodul	5.50	5.50	5.00	5.00	5.50	5.00	5.00	6.00	6.00	4.50	5.50	4.50	4.50	4.00	7.00	7.00	8.00
Zsun	24.00	25.00	27.00	28.00	26.00	29.00	26.00	23.00	22.00	33.00	23.00	32.00	31.00	37.00	20.00	19.00	17.00
Gesamtbreite	117.2	109.7	122.1	115.0	104.4	109.4	132.7	107.3	120.2	116.6	137.5	123.4	131.5	138.0	110.3	124.1	123.3
Außendurchmesser [mm]	528	550	533	552	571	571	513	556	530	576	502	559	542	567	569	538	556
Geometry.Mass, total Gearbox	108.6	109.5	110.2	110.4	111.0	111.0	111.5	112.3	113.7	113.9	114.5	114.5	115.3	122.4	123.2	124.3	134.1
Geometry.sun.di	113.9	120.3	120.9	126.7	126.6	132.4	115.1	117.3	110.4	140.0	107.6	134.8	129.6	142.9	112.7	104.6	101.0
Drehzahl / Resonanzdrehzahl (P/R)	106%	113%	117%	124%	121%	131%	110%	108%	100%	145%	99%	138%	131%	155%	100%	92%	87%



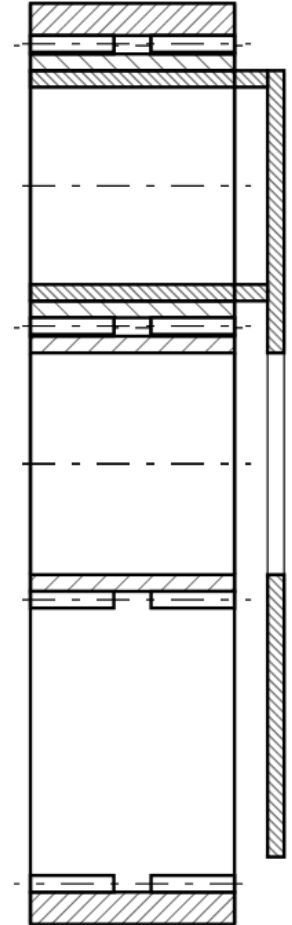
Validierung PW1000G

Validierung Vorentwurfsmodus

- Ergebnisraum liefert plausible Entwürfe
 - Entwurf bei Kenntnis von Getriebeparametern gut verfeinerbar
 - Gewicht erscheint realistisch
 - Quantitative Validierung schwierig
- Graphische Darstellung
 - Vereinfachte Geometrieausgabe als .svg
- Beeinflussungsfaktoren (Kalibrierung):
 - Sicherheitsfaktoren SF
 - Schrägungswinkel Beta
 - Kranzstärken Sonne+Planet
 - Lagerung, Gehäuse, Planetenträger

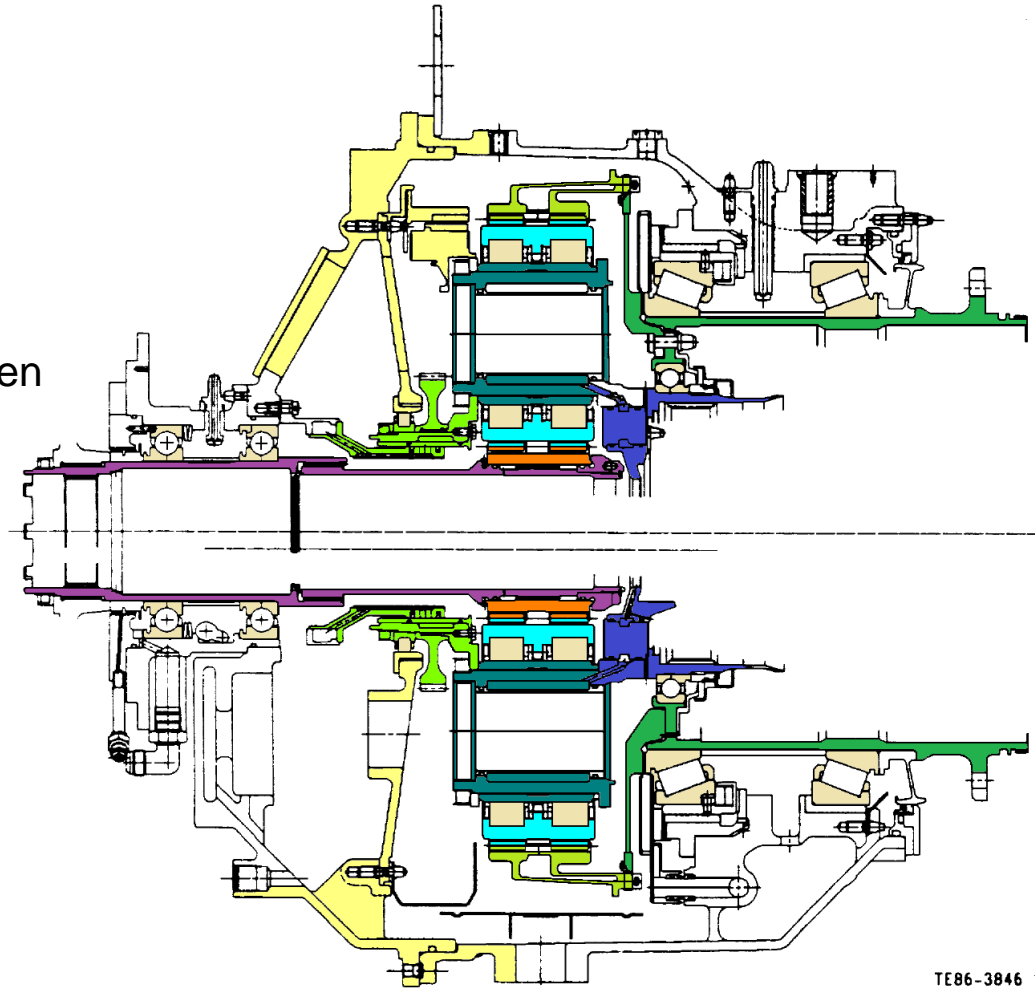


Quelle: Pratt&Whitney



Validierung NASA Getriebe „AGBT“

- NASA Projekt (1984)
- Entwicklung eines gegenläufigen Propellertriebwerks
- Umlaufrädergetriebe im Dreiwellenbetrieb (Differential)
- Validierungsdaten größtenteils gegeben
- Teilweise ablesen in Skizze nötig
- Daten beinhalten Propellerlagerung+Wellensystem
 - Bilanzgrenze Getriebe unklar
- Prüfstandsmodell: Gewichte teilweise nicht Luftfahrt-optimiert.



TE86-3846

Quelle: Nasa Advanced GearboxTechnology
Final Report, Nasa CR-179625, Bearbeitet



Validierung AGBT

Validierungsdaten aus Literatur

Table 3.9-1.
Gearbox weight summary.
(Weights listed are measured weights unless noted.)

Gears**	Qty	Unit Weight	Total Weight
Sun	1	8.938	8.938
Planet gear and bearing Assy	4	16.060	64.240
Ring-long	1	25.200	25.200
Ring-short	1	23.550	23.550
			121.848
Housing assemblies**			
Main	1	99.522	99.522
Cover	1	49.428	49.428
Inner support	1	12.411	12.411
Input bearing and seal	1	47.282	47.282
			208.643
Carrier Assy** (including spacers)	1	115.028	115.028
Bearings**			
Prop	2	45.298	90.596
Planet (rollers/cage/inner race)	4	12.730	50.920
Carrier-ball	1	7.270	7.270
Carrier-roller	1	4.120	4.120
Input	2	6.193	12.386
			166.090
Shafting**			
Prop	1	64.400	64.400
Input	1	10.540	10.540
Sun gear	1	8.511	8.511
Free diaphragm	1	27.275*	27.275
			110.726
Total gearbox weight - all fasteners + misc = 875.775			

Geometriedaten (Auswahl)

Normalmodul	3.6286
Zähnezahl	
Sonnenrad	36
Planetenrad	48
Hohlrad	132
Teilkreisdurchmesser	
Sonnenrad	145.3 mm
Planetenrad	193.8 mm
Hohlrad	532.9 mm
Außendurchmesser	≈ 565.9 mm
Normaleingriffswinkel	22.5°
Schrägungswinkel	26°
Material:	CBS 600, EMS 64500

Belastungen

Leistung	9561.48 kW
Eingangsdrehzahl	9500 1/min
Ausgangsdrehzahl	1140 1/min
Übersetzung	-8.33

Masse

Gears	55.27 kg
Housing Assembly* (Not flight weight Hardware)	94.64 kg
Carrier Assy	52.18 kg
Bearings total	75.34 kg
(Planetary Bearings)	23.1 kg)
Shafts (total)	50.22 kg
Gesamtgewicht	397.2 kg



Validierung AGBT

Vergleich Kisoft GtGearbox (Nachrechnung)

- Nachrechnung bei Vorgabe der Geometrie
- Kein Normalmodul
 - Bei Nachrechnung kein Problem
- Vergleich mit Kisoft zeigt wieder gute Übereinstimmung
- Abweichungen
 - Profilverschiebung ($\Rightarrow Y_{FS}$)
 - Evtl. unterschiedl. Modellierung
 - Dynamikfaktor
 - Unstimmigkeit VDI-Norm

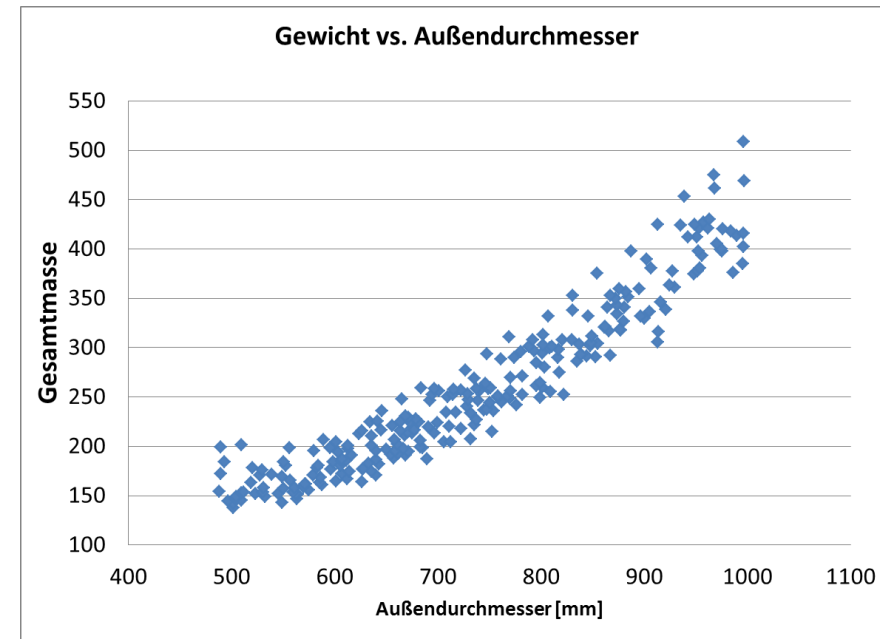
	Kisoft	GtGearbox	Rel. Abw.
Sicherheitsfaktoren Zahnfußbruch [-]			
Sonne-Planet Eingriff: Sonne	1.63	1.662	1.96%
Sonne-Planet Eingriff: Planet	1.14	1.156	1.40%
Planet-Ring Eingriff: Planet	1.35	1.369	1.40%
Planet-Ring Eingriff: Ring	1.7	1.676	-1.44%
Sicherheitsfaktoren Pitting [-]			
Sonne-Planet Eingriff: Sonne	1.43	1.430	-0.02%
Sonne-Planet Eingriff: Planet	1.43	1.430	-0.02%
Planet-Ring Eingriff: Planet	3.05	3.022	-0.91%
Planet-Ring Eingriff: Ring	3.05	3.022	-0.91%
Sicherheitsfaktor VDI gegen Kranzbruch [-]			
Sicherheit gegen Dauerbruch: Ring	1.161	1.174	1.15%



Validierung AGBT

Vorentwurf

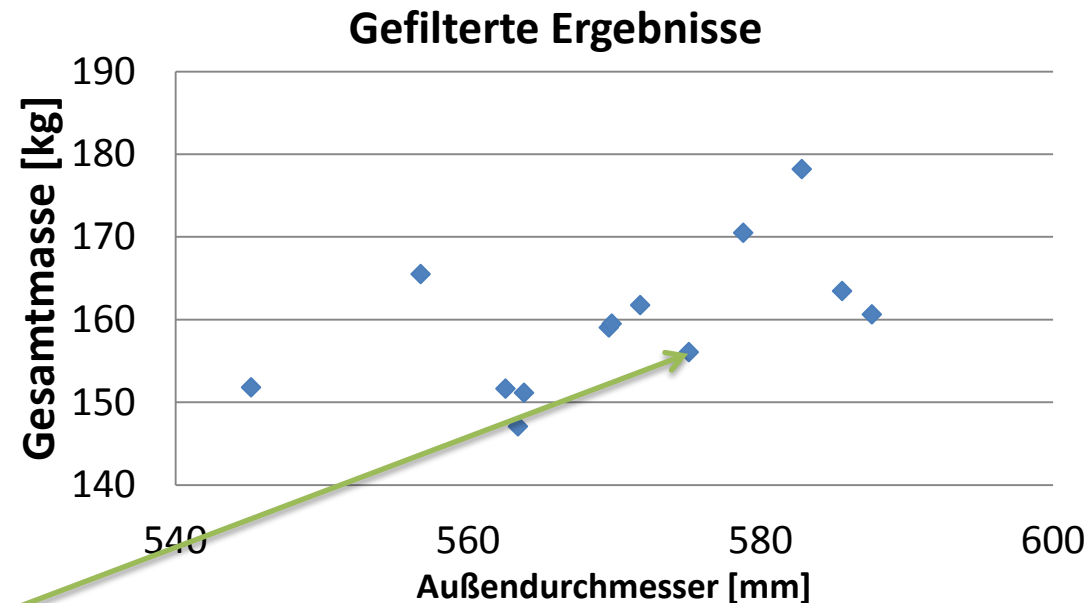
- Annahmen:
 - Lastfall aus NASA Paper
 - Kranzstärke Planet: $4 \cdot m_n$ (Lager)
 - Sonst keine Vorgaben für Zahnräder
 - Planetenträger (Stahl, 7mm)
 - Gehäuse (Alu, 10mm)
 - Ringwelle (Stahl, 10mm)
 - Lager: Zylinderlager ohne Außenring
 - Material: 17CrNiMo6
 - Sicherheiten aus Nachrechnung verwendet!
 - Modul: 2-10mm, Z_{sun} : 10-80
- Nächster Schritt: Filterung!
 - Max. Durchmesser 600mm
 - Min. Innendurchmesser: 100mm
 - Max. Breite: 100mm



Validierung AGBT

Vorentwurf

- Deutliche Design-Unterschiede
 - Anzahl Planeten
- Ergebnis abhängig von Geometriebewertung
 - Innerer Durchmesser
 - Breite
 - Anzahl Planeten
- Mehrere Designs plausibel
- Relativ ähnliche Ergebnisse bzgl. Masse und Geometrie

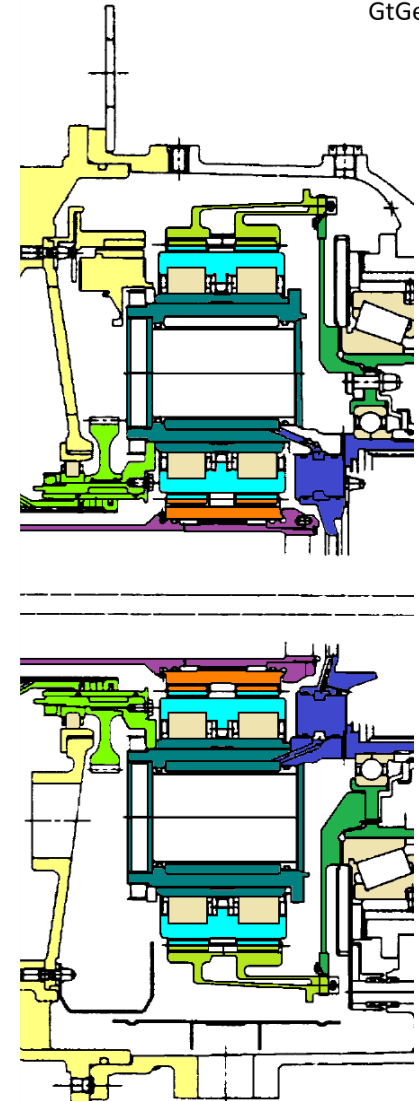
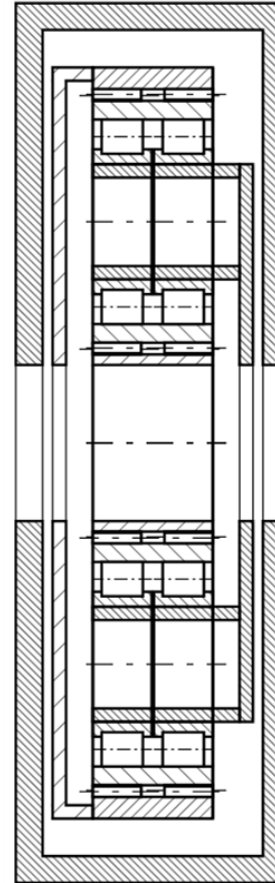


		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Literatur	Abw. -	Abw. +
Normalmodul	mm	4.50	4.00	3.50	4.00	3.50	5.00	4.50	3.50	3.00	4.00	2.75	3.00	2.75	3.6288		
Zsun	-	27.0	31.0	35.0	30.0	36.0	25.0	28.0	37.0	42.0	32.0	45.0	43.0	47.0	36		
Breite Zahnrad	mm	98.1	88.3	89.5	84.7	87.4	92.8	79.0	85.4	98.4	73.1	95.9	86.0	92.3	~88.8	-17%	
Außendurchmesser	mm	563.4	563.8	562.6	545.2	575.1	569.7	569.8	587.6	571.8	585.6	556.8	578.8	582.8	~570	-4%	
Gesamtmasse	kg	147.0	151.1	151.6	151.8	156.0	159.0	159.5	160.6	161.7	163.4	165.5	170.5	178.2	n/a		
Masse Zahnräder	kg	59.7	54.8	52.2	54.9	52.4	65.4	57.8	52.6	53.3	52.4	51.1	50.8	52.0	55.27	-8%	18%
Innendurchmesser	mm	108.8	115.2	117.0	110.6	121.0	109.3	114.0	125.0	124.5	119.8	123.6	128.0	130.0	114	-4%	-
Masse Planetenlager	kg	14.4	22.4	25.1	25.5	27.1	18.5	26.7	29.1	29.8	33.4	36.7	39.6	43.4	23.1	-20%	30%
Anzahl Planeten	-	3	4	4	5	4	4	5	4	4	5	5	5	5	4		

Validierung AGBT

Vergleich Geometrie (Vorentwurf)

- Vergleich Literatur vs. Design Nr. 5
 - Geometrieübersteinstimmung
 - Durchmesser : $\Delta_{rel} = 0.9\%$
 - Breite: $\Delta_{rel} = -1.6\%$.
 - Lagerhöhe: Abweichung!
 - Folge für Planetenträger
 - Sonstige Anbauteile nicht berücksichtigt
 - Übereinstimmung Gewicht
 - Gewicht Zahnkränze
 - $\Delta_{rel} = -5\%$
 - Gewicht Planetenlager
 - $\Delta_{rel} = 17\%$
- Andere Designs:
 - Streuung bzgl. Breite, Durchmesser und Gesamtgewicht bei ca. $\pm 10\%$
 - Gute Kalibrierbarkeit



Quelle: Nasa Advanced GearboxTechnology
Final Report, Nasa CR-179625, Bearbeitet

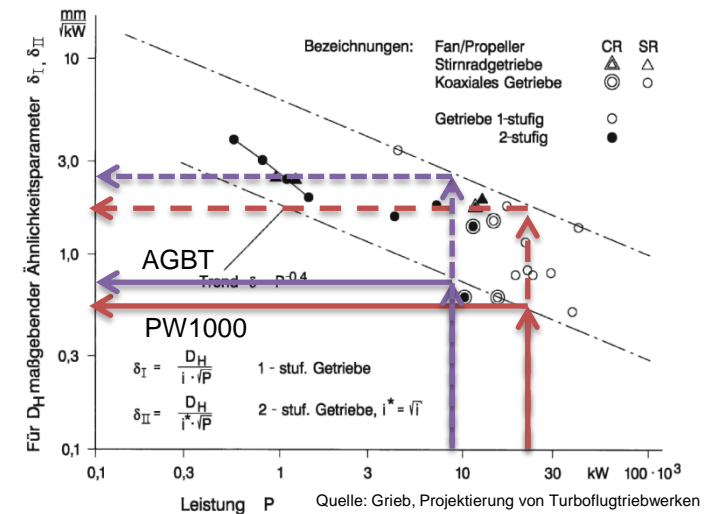
Validierung Durchmesser-Korrelation Grieb

PW1000

- Außendurchmesser
 - Literatur: n/a
 - GtGearbox: 500 – (580) mm
 - Grieb: 244 – 840 mm

NASA AGBT

- Außendurchmesser
 - Literatur: 570 mm
 - GtGearbox: 545 – (590) mm
 - Grieb: 263 – 904 mm



- Erhebliche Streubreite der Korrelation
- GtGearbox liefert deutlich plausiblere Werte



Validierung

Masse: Korrelation GRIEB + NASA

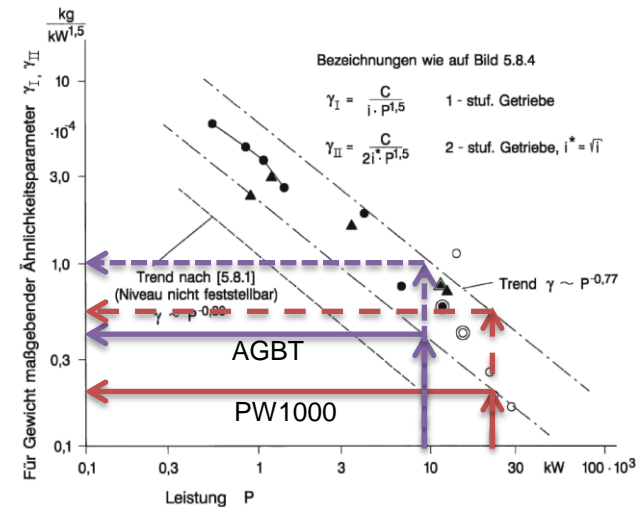
PW1000

- Literatur: 113 kg
- GtGearbox: 108 – 125 kg
- Grieb: 240 kg – 640 kg
- NASA: 419 kg (Gearbox+Lube)

NASA AGBT

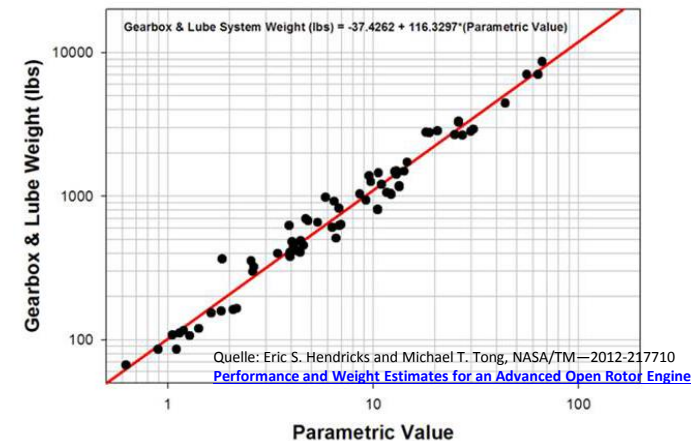
- Literatur [428 kg] (Nicht Flight Weight)
- GtGearbox 145 - 170 kg
- Grieb: 135 - 359 kg
- NASA: 377 kg (Gearbox+Lube)

- Erhebliche Streubreite der Grieb-Korrelationen
- Starke Abweichung zwischen NASA Korrelation und GtGearbox
 - Bilanzgrenzen unklar, vermutliche Hauptursache



Quelle: Grieb, Projektierung von Turboflugtriebwerken

$$\text{Parametric Value} = (\text{hp}/\text{RPM}_{\text{out}})^{0,75} \cdot (\text{RPM}_{\text{in}}/\text{RPM}_{\text{out}})^{0,15}$$



Studentische Arbeiten InSim, mit Getriebebezug

- Bachelorarbeit:
 - Tobias Haase, *Entwicklung eines Vorentwurfsverfahrens für Planetengetriebe in zivilen Luftfahrtantrieben*, DLR, 2015
- Projektarbeit:
 - Tobias Haase: *Validierung und Weiterentwicklung einer Vorentwurfsmethodik für Luftfahrtgetriebe*, DLR, 2016
- Masterarbeit:
 - Björn Schneider: *Implementierung von Vorentwurfsverfahren für Wälzlager und Wellen in den Triebwerks-Gesamtentwurf*, DLR, 2017
- Bachelorarbeit:
 - Dominik Maaß: *Weiterentwicklung und Validierung eines Vorentwurfsverfahrens für Getriebe in Flugantrieben*, DLR, 2017



Zusammenfassung

- Prototyp von GtGearbox ist erstellt
 - Physikalische Modellierung vorgestellt
 - Variations- und Optimierungsmöglichkeiten präsentiert
- Validierung der Methodik:
 - Vergleich mit KiSSsoft liefert sehr gute Übereinstimmung (Studentische Arbeit)
 - Verbleibende Abweichungen gut erklärbar, größtenteils nicht relevant
- Vergleich mit Realdaten:
 - Unterschiedliche Zielgrößen möglich, Limitierungen durch User erforderlich
 - Streuung (Dimension, Masse) bei plausibler Limitierung gering
 - Bilanzgrenze Getriebe /Triebwerksstruktur oft unklar



Zusammenfassung

- Vergleich mit Korrelationen aus Literatur
 - Geringe Aussagekraft der Korrelationen
- Vergleich PW1000
 - Wenig Validierungsdaten im DLR verfügbar
 - Masse gut getroffen
 - Geometriedaten scheinen plausibel
- Vergleich mit NASA Getriebeauslegung (AGBT)
 - Sehr gute Abbildbarkeit der Verzahnungsgeometrie
 - Zahnradmasse wird gut getroffen
 - Lagergewichte der Planeten gut getroffen
 - Sonstige Masse nicht vergleichbar
 - Bilanzgrenze unklar



Nächste Schritte

- Beginn Toolerweiterung: Spur-Star Getriebe
- Wirkungsgrad
 - Einführung Verzahnungswirkungsgrad nach Winter
 - Einführung Lagerverluste
- Lagerlasten
 - Berechnung der Lagerlasten integrieren
- Vereinfachte Festigkeitsbetrachtung für Wellen
 - Bestimmung Wandstärke Planetenträger und Ringwelle
- Bekannte Fehler in VDI Norm beheben
 - Rückmeldung VDI analysieren
- GTlab Integration durchführen
 - Datenmodell GTlab/CAD Kernel aktualisieren



Vielen Dank



Tom Otten

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Antriebstechnik

Triebwerk | Triebwerksvorauslegung

Tel: +49 2203 601 2944

Mail: Tom.Otten@dlr.de

